

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.012

福州晋安河片区海绵改造对城市内涝的影响

叶陈雷^{1,2}, 徐宗学^{1,2}, 雷晓辉³, 廖卫红³, 张瑞^{1,2}, 初祁^{2,4}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875;
3. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 4. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124)

摘要:为研究海绵改造对城市洪涝的影响, 有效提高城市对洪涝问题的韧性, 对福州市晋安河片区海绵改造效果进行分析。基于 InfoWorks ICM 模型对片区管网、地表、河道进行耦合模拟, 设计了7种海绵改造方案, 对各方案计算结果进行评估, 并进一步选择琴亭湖附近典型排水片区, 量化分析了海绵城市建设与湖库联合调度协同措施下片区的内涝响应。结果表明: 构建的洪涝模拟模型能有效模拟晋安河片区暴雨内涝过程, 不同的海绵改造措施对最大淹没面积、溢流节点数、超载管道数以及主河道不同断面水位的影响有所不同; 全域海绵改造与管网优化组合的方案作用下, 模拟得到的海绵改造综合效益最优。苏迪罗台风降雨驱动下, 典型排水片区在无海绵改造措施下的总淹没面积为 22.87 hm², 采用可持续的城市排水系统(SUDS)措施后, 淹没面积减小为 22.48 hm², 进一步加入调度规则, 总淹没面积减小为 9.83 hm², 仅采用源头海绵改造措施在面对极端降雨时效果有限, 结合 SUDS 与湖库调度可以有效减缓内涝问题。

关键词: 海绵城市; 城市内涝; 城市排水系统; InfoWorks ICM; 湖库调度; 熵权法; 福州市

中图分类号: TV122⁺.1; P333.2 **文献标志码:** A **文章编码:** 1004-6933(2023)01-0083-10

Influences of sponge reconstruction of Jin'an River drainage district in Fuzhou City on urban flooding/waterlogging // YE Chenlei^{1,2}, XU Zongxue^{1,2}, LEI Xiaohui³, LIAO Weihong³, ZHANG Rui^{1,2}, CHU Qi^{2,4} (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 3. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to study the influence of sponge reconstruction on urban flooding/waterlogging and effectively improve the resilience of cities to flooding problems, a sponge reconstruction effect analysis was carried out in Jin'an River drainage district of Fuzhou City. Seven sponge reconstruction schemes were designed based on coupled simulation of the district's pipeline network, ground surface, and rivers with the InfoWorks ICM model, and the calculation results of different schemes were evaluated. Furthermore, with a typical drainage area near Qinting Lake as the object, flooding responses under the cooperative measures of the sponge city construction and joint scheduling of lakes and reservoirs were quantified and analyzed. The results show that the constructed model can effectively simulate the rainstorm waterlogging process in the Jin'an River drainage district, and influences of different sponge reconstruction measures are different on the maximum inundation area, the number of overflow nodes, the number of surcharged pipes, and the water level of different sections of the main river channel; the comprehensive benefit is the best under the combination of the whole-area sponge reconstruction and pipe network optimization. Under the Soudelor typhoon rainfall, the total inundation area of the drainage area without adopting sponge reconstruction measures was 22.87 hm², which was reduced to 22.48 hm² after adoption of the sustainable urban drainage system(SUDS), and further to 9.83 hm² after incorporation of the scheduling rules, demonstrating that the effect of source sponge modification is limited in face of extreme rainfall, and combining SUDS with lake and reservoir scheduling can effectively mitigate flooding problems in the study area.

Key words: sponge city; urban flooding/waterlogging; urban drainage system; InfoWorks ICM; lake and reservoir scheduling; entropy weight method; Fuzhou City

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52239003)

作者简介: 叶陈雷(1991—), 男, 博士研究生, 主要从事城市洪涝数值模拟研究。E-mail: clye@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 徐宗学(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

受气候变化和快速城市化等的影响,我国城市屡次遭受洪涝灾害的威胁,“城市看海”已成为我国许多大中型城市的顽疾^[1]。2021年7月,受台风“烟花”的影响,河南多地遭受严重的洪涝损失。其中,郑州市遭遇“7·20”特大暴雨,最大1h降水量高达201.9 mm,突破了历史最高值,造成城市大面积严重积水,大批车辆被淹,城市陷入瘫痪^[2]。据统计,这次暴雨洪涝事件导致郑州市292人遇难,47人失踪,直接经济损失532亿元^[3]。

全球气候变化、副热带高压控制等复杂气候条件对城市洪涝带来诸多威胁^[4],城市雨岛效应等导致城市局部极端强降雨频发^[5]。快速城市化条件下,不断扩张的城市不透水下垫面逐步取代原先天然状况下的透水地面,农田、植被、湿地等逐步被硬化路面取代,天然状态下地表对降雨的下渗作用被大大削弱^[6]。城市中人类活动集中,湖泊、河道上建设有各种各样的水利工程,这些水工设施的建设使自然状态下的水系特征以及水循环过程发生了较大的改变^[7]。此外,城市还具有极为明显的社会性,自然水循环与社会水循环并存,使城市水循环的驱动力、结构与过程更为复杂,城市洪涝等城市水问题愈加凸显^[8]。

水文水动力学模型是模拟城市暴雨内涝的核心技术,而具体到防洪减灾措施上,城市水工程调度和海绵城市建设是重要的城市水系管理调控措施^[9]。建设有效的防洪排涝设施、优化水工建筑空间布局、完善城市水系闸泵堰库等的工程建设均能促进城市防洪排涝能力的提升。而加快海绵城市建设也是缓解城市内涝的重要途径^[10]。2021年4月,财政部、住房和城乡建设部、水利部联合发布《关于开展系统化全域推进海绵城市建设示范工作的通知》,明确指出将系统化全域推进我国海绵城市建设。目前,已有不少关于海绵城市建设对城市洪涝减缓效益分析的研究。程涛等^[11]通过对济南海绵示范区进行的海绵改造分析发现,不同海绵设施的空间布局和管网改造方案对径流量与水深具有不同的影响效果,提出宜针对城市具体特点,从流域水循环角度来制定具体的改造措施。王丽晶等^[12]以北京市东城区为研究区,研究了不同降雨情景下海绵改造前后管网排水能力与淹没情况。高玉琴等^[13]综合考虑生态、经济等因素,基于云模型构建了低影响开发(low impact development, LID)效益评价体系。此外,不少研究集中在LID方案组合评估^[14-15],LID对雨水径流^[16-17]、内涝与面源污染^[18]和内涝风险^[19]的影响,以及LID下城市防洪排涝建设成本等社会效益^[20-21]方面。结合城市具体的下垫面特点,相应提出海绵改造方案,可以有效缓解城市洪涝现状。

本文以福州主城区晋安河片区为研究对象,在构建洪涝模拟模型的基础上,采用若干套海绵改造方案,基于熵权法选择最优方案,分析了海绵改造措施与湖库调度对城市内涝的协同影响。

1 研究区概况

福州市江北城区位于福州盆地的中心地带,为福州市主城区,东西北三面群山环抱,东起鼓山,北至北峰山脉,西至洪山,南临闽江北港。城区河网水系复杂,北部天然河道坡度较大;中部属于平原河网区,树状、环状河网交错;南部与闽江相连接,属于典型的感潮河网,下游受外江潮位影响,流态复杂。城区共67条内河,分为白马河水系、晋安河水系、光明港水系、磨洋河水系和新店片水系。相比于更接近闽江的白马河水系与光明港水系,晋安河水系受闽江潮位顶托作用较弱。本文选择江北城区内的晋安河片区为研究区,图1为研究区概况。研究区北部以东北部山区为界,西部以登云路—连江北路—长乐北路—福马路—远洋路为界,东面以华林路—鼓屏路—荷塘路为界,南面以光明港—闽江为界。晋安河片区城市化集中,居民众多,是福州市重要的集防洪、排涝、输水、景观多功能于一体的主干渠道,在福州城区具有重要的意义。近年来,福州市城区河道实施了河道整治和“引水冲污”工程,并扩建湖库、新建排涝闸站,城区水文情势发生了很大变化,水系的洪水调蓄能力、河道的行洪能力等均有所改观。

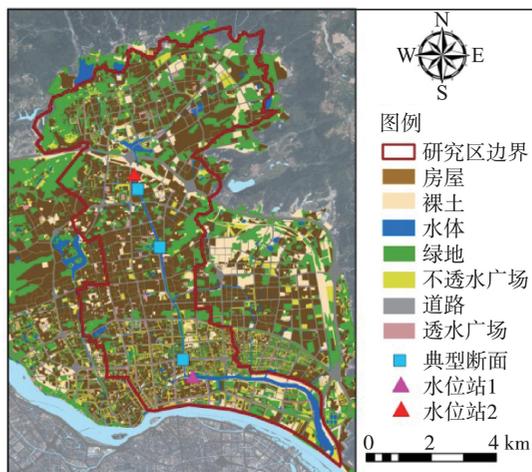


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

2 研究方法

2.1 洪涝模拟模型

城市暴雨内涝包含多个物理过程,一般突遇短历时强降雨后,城市排水系统由于无法及时排泄雨洪而使城市发生洪涝,甚至造成洪涝灾害。通常用

水文学方法模拟降雨经下垫面入渗、填挖、截留等损失后形成的地表径流和净雨形成汇水区出口流量的过程;用水动力学方法模拟管渠排水以及地表漫溢过程。本文基于 InfoWorks ICM(integrated catchment management)模型完成水文水动力过程模拟。基于泰森多边形划分子汇水单元,依据研究区遥感影像图反映的河道、街道、建筑等得到修正后的子汇水单元,并将其作为城市产汇流计算基本单元。ICM 提供了多种内置方法模拟城市产汇流,考虑到研究区下垫面构成以及水文模型的分布式特点,利用内置的 ATO(area take off)模块确定每个子汇水区的土地利用类型组成,具体的水文参数则针对每一种土地利用类型进行设置。汇水区土地利用类型大体上可以看作透水面和不透水面两种,透水面采用霍顿下渗法计算下渗过程,不透水面则采用固定径流系数法简化计算。净雨的坡面汇流过程模拟采用基于非线性水库和动力波法的暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)。

本文中一维水动力过程基于完全的圣维南方程组实现,采用 Preissmann 四点隐式差分格式求解;二维水动力过程采用求解浅水方程模拟,并采用 Roe 格式近似黎曼解求解数值通量。管网汇流与河网汇流均为一维水动力过程,两者采用河道汉点连接,以实现水量的交换。一维与二维水动力过程的交互过程有多种实现方式,本文采取了其中的两种:①排水管网超载状态下,溢流量形成地表淹没;②河道与城区地表二维网格的横向交互。在计算二维网格淹没过程时,考虑到研究区内建筑物较多,且建筑物所在区域一般不会被水流淹没,因此,在构建模型时,提前在 ArcGIS 中对建筑物图层进行预处理,并设置为空白区,与有效计算网格间无质量与动量交换,使其不参与二维水动力过程的计算。网格分辨率设置为 25 ~ 50 m²,模拟时间步长取为 10 s。

2.2 洪涝模型合理性分析

相比于天然流域,城市的空间尺度一般较小,这使得城市中的暴雨内涝模拟往往缺乏足够的验证数据^[22]。为说明模型模拟结果的合理性,本文从两个降雨场次水位数据、易涝区和典型积水点淹没特征 3 个方面对模型合理性进行分析。详细的建模过程见文献[10,23],城市下垫面在模型中被简化为不透水面(道路、房屋等)与透水面(绿地等)。道路面固定径流系数取 0.95,汇流参数取 0.018;房屋固定径流系数取 0.9,汇流参数取 0.02;其他透水面采用霍顿下渗模型计算,汇流参数取 0.025。

降雨是产生内涝的主要原因,也是驱动仿真模型的关键因素。暴雨强度公式采用 DBJ13-52—

2003《福建省城市及部分县城暴雨强度公式》,其表达式为

$$q = \frac{2136.312(1 + 0.700\lg P)}{(t + 7.576)^{0.711}} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度, L/(s · hm²); P 为重现期, a; t 为降雨历时, min。设置 10 年一遇、20 年一遇、50 年一遇、100 年一遇 4 种降雨情景,降雨历时为 2 h 降雨情景下,最大雨强分别为 211.79 mm/h、238.05 mm/h、272.75 mm/h 和 298.96 mm/h,总降水量分别为 83.04 mm、93.34 mm、106.94 mm 和 117.24 mm。

收集到 2021 年 6 月 29 日与 2021 年 8 月 5 日两场降雨下晋安河两个水位站的监测数据,两个水位站(图 1)分别位于晋安河与凤坂河交汇处(水位站 1)和琴亭湖附近(水位站 2),图 2 给出了模拟水位与实测水位的对比。经分析,对于 20210629 场次降雨,均方误差(mean square error, MSE)为 0.012,均方根误差(root mean square error, RMSE)为 0.01;对于 20210805 场次降雨, MSE 为 0.016, RMSE 为 0.13。结果显示,实测数据与模拟结果基本吻合,模型对两场降雨的模拟结果符合城市洪水的基本规律,表明模型较为可靠。

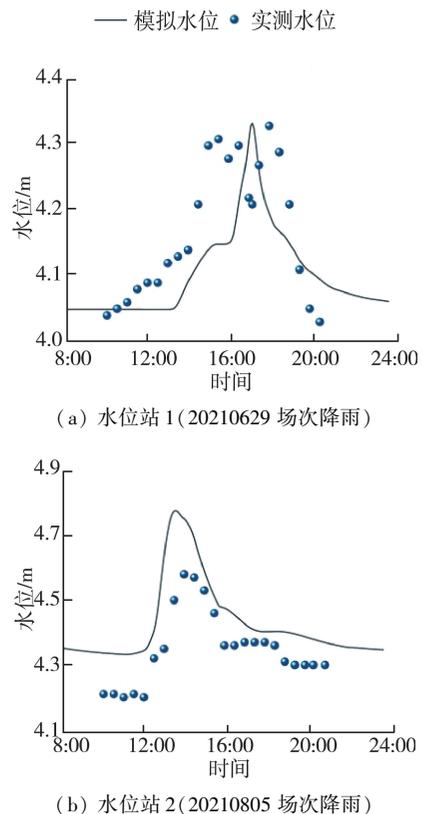
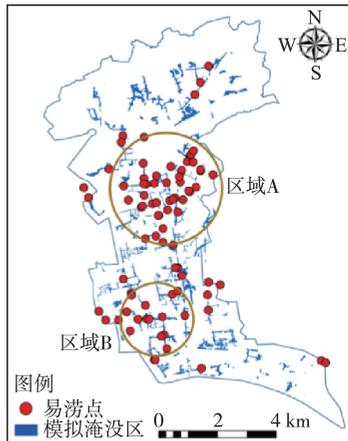


图 2 两场降雨实测水位与模拟结果对比

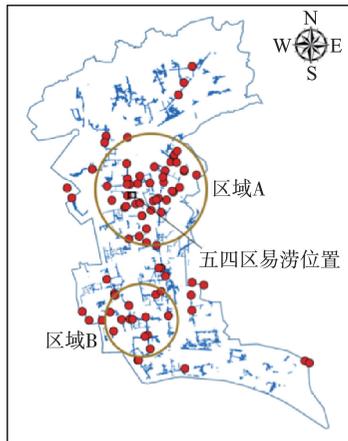
Fig. 2 Comparison of observed and simulated water levels of two rainfall events

图 3(a)和(b)分别为 50 年一遇和 100 年一遇两种设计暴雨下的研究区模拟淹没范围与实测易涝点

的对比,其中,红色圆点表示 30 个实测历史台风(包括“鲇鱼”、“苏迪罗”台风等)出现时研究区内易涝点数据,这些数据由福州市城区水系联排联调中心提供;而图中蓝色区域表示模拟出的淹没范围(统计了淹没深度大于 0.02 m 的城区范围)。可以看出:①在研究区大部分位置模拟拟效果较好,模拟位置和实测易涝点位置基本吻合;②研究区北部模拟得到的淹没区位置明显多于给出的易涝点位置,这是由于北部区域位于山区与中心城区的衔接处,虽然局部位置有积水,但居民较少,缺乏足够实测数据;③实测易涝点是搜集的典型易涝位置,对其他局部小水深淹没区未完全统计,因而模拟的淹没范围要更大。



(a) 50 年一遇



(b) 100 年一遇

图 3 模拟淹没区与易涝点位置对比

Fig. 3 Comparison of simulated inundation areas and location of flood prone points

提取二维网格计算结果进一步分析,图 4 为典型积水位置(五四区易涝位置,见图 3)的模拟淹没水深过程线。淹没水深约在模拟开始后约 100 min 达到最大,比雨峰滞后约 40 min;2 种重现期设计暴雨的淹没水深均呈现先增加后减少的变化趋势,其中,在淹没水深增加阶段,曲线斜率的变化反映出水深增加速率呈现由快到慢的过程,这与设计暴雨的雨型相一致。

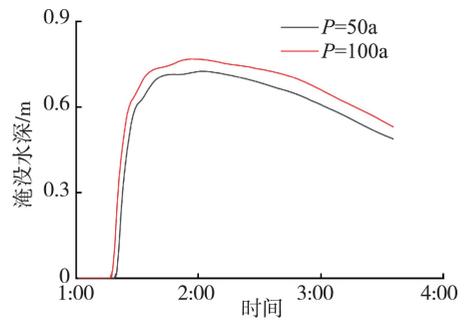


图 4 五四区易涝位置模拟水深过程线

Fig. 4 Processes of simulated water depth at flood prone location in Wusi area

2.3 海绵改造措施及方案优选

发展可持续的城市排水系统(sustainable urban drainage system, SUDS)越来越被认为是小型住宅、商业或休闲开发计划的必要措施。通过增加水流在下垫面上的入渗和蓄存量,使进入地下排水系统的径流量减少,或是通过改变汇流路径等措施延缓各汇水区峰现时间,有效限制新开发设施对下游现有排水系统的影响。在 ICM 中,SUDS 建模结构参考了建筑业研究与信息协会(Construction Industry Research and Information Association, CIRIA)报告与 SWMM 中的 LID 理念^[24]。具体地,ICM 中的 SUDS 模块采用了池塘节点、侧向流管道、可渗透连接以及子汇水区控制等措施。本文在进行海绵改造时,兼顾绿色基础设施与灰色基础设施的协同作用。绿色基础设施是 20 世纪 90 年代中期提出的一个概念,提倡通过新的建设模式最大程度降低对原有自然生态环境的破坏,主要由 LID 设施和自然基础设施(natural infrastructure, NI)构成;灰色基础设施指与城市雨洪管理相关的排水管网、蓄滞设施以及污水处理设施等^[25]。ICM 中,子汇水区可以采用生物滞留池、雨水花园、绿色屋顶、渗渠、透水铺装、雨水桶与植草沟等 SUDS 措施,本研究中根据研究区下垫面土地利用类型组成,采用生物滞留池、绿色屋顶与透水铺装组合的绿色源头设施。其中,生物滞留池垂向结构由表面层、土壤层与储水层构成,将降雨与附近径流转化为地表径流、盲管排水、下渗量;绿色屋顶布设在典型房屋面上,由表面层、土壤层、排水垫层构成,降雨与附近径流经转化后主要转为地表径流与下渗量;透水铺装由表面层、土壤层、储水层构成,一般用来对不透水路进行改造,降雨与附近径流转化为地表径流、盲管排水、下渗量。

城市洪涝过程具有多过程的特点,包括产汇流、管(渠)道排水、地表漫溢等基本过程,还伴随河道漫溢、面源污染等过程。传统绿色海绵侧重于从源头来治理内涝,减少在一次降雨中直接汇入管网的

水量,并削弱洪峰流量,而灰色海绵则侧重于对排水过程中的水量进行控制,不同的海绵改造方案对各过程的影响具有不确定性。管网系统、河网与地表是洪涝过程的基本媒介,本文在设置不同海绵改造方案后,采用熵权法赋权并对不同改造方案的效益进行分析。赋权过程主要步骤包括:①确定样本和指标;②将原数据进行归一化处理;③计算各指标下样本的比重;④计算指标的熵值;⑤计算指标的信息效用值;⑥计算指标的熵权;⑦计算综合评价指数。

3 结果分析

3.1 海绵改造下的洪涝响应

不同的海绵改造措施组合及空间布局产生不同的洪涝削减效果。晋安河片区占地面积较大,首先从全域尺度对片区进行海绵改造,参考相关文献设置海绵改造方案^[11]。结合设计暴雨下研究区模拟结果,识别出晋安河片区内的两个易涝区域。一是琴亭湖下游至五四片区附近的中心城区(区域A,见图3);二是位于研究区西南部的五一中路与六一中路之间区域(区域B,见图3)。结合研究区下垫面土地利用类型组分与内涝模拟结果设置了7种海绵改造方案。方案1为原始状态下不添加任何措施,用来与其他方案进行对比;方案2~4对片区全域进行绿色海绵改造和灰色海绵改造;方案5~7对识别出的易涝区域A、B分别进行海绵改造,但相比方案2~4,改造幅度更大。具体方案见表1。

采用福州10年一遇、20年一遇、50年一遇、100年一遇4种重现期的降雨驱动模型,在暴雨内涝时,城市河道水位、地表淹没面积以及管网溢流状态均是内涝的重要因素。分别统计各降雨情景下,沿晋安河的3个断面(从上游至下游依次为上断面、中断面、下断面,见图1)的最高水位、城区最大淹没面积、溢流节点数、超载管道数。图5为6个指标在各方案下的模拟结果,在同一种方案下,随着重现期增加,河道关键断面水位、淹没面积、溢流节点数、超载管道数均呈现增大的趋势。在50年一遇的降雨情

景下,最大淹没面积、溢流节点数、超载管道数在方案4下表现最优;3个断面的水位在方案2下表现最优。在方案4下,最大淹没面积相比方案1(未改造方案)减少了236.4 hm²,占比46.5%;溢流节点数相比方案1减少997个,占比47.4%;超载管道数相比方案1减少1360根,占比33.9%。在方案2下,上断面最高水位比方案1降低0.34 m,占比5.0%;中断面最高水位比方案1降低0.21 m,占比3.7%;下断面最高水位比方案1降低0.16 m,占比3.2%。其他重现期降雨下的规律与50年一遇降雨类似。

3.2 海绵改造方案优选

将反映管网溢流、河道水位、地表积水的6个关键洪涝指标作为各方案的特征变量,并将不同重现期下各方案模拟结果代入,经过标准化处理,计算信息效用值。由于在应对暴雨内涝时,6个指标均为逆指标,即数值越小越优,因此采用下式对指标值进行归一化处理:

$$x' = \frac{x_{j\max} - x_{ij}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个样本的第 j 个指标值; x' 为归一化后的指标值; $x_{j\max}$ 、 $x_{j\min}$ 分别为第 j 个指标的最大和最小值。

计算得到上断面最高水位、中断面最高水位、下断面最高水位、最大淹没面积、溢流节点数、超载管道数6个指标的信息效用值依次为0.003、0.006、0.052、0.009、0.009、0.004,指标权重依次为0.037、0.080、0.614、0.112、0.109、0.048。以50年一遇降雨为例,7种方案综合评价指数分别为0.17、0.56、0.30、0.86、0.27、0.28、0.43,方案优先排序为方案4、方案2、方案7、方案3、方案6、方案5、方案1。在10年一遇、20年一遇、50年一遇、100年一遇降雨情景下,7种海绵改造方案的综合评价指数值见表2。可见,海绵改造措施效益表现最好的方案均为方案4,且各方案优先次序与50年一遇降雨下的结果基本一致。

表1 海绵改造方案

Table 1 Sponge reconstruction schemes

方案	海绵改造方案	改造区域	海绵改造措施	
			绿色海绵改造	灰色海绵改造
1	不改造			
2	全域SUDS优化	晋安河片区全域	增加地表下渗率	
3	全域管网优化	晋安河片区全域		增大管径50%
4	全域SUDS优化+全域管网优化	晋安河片区全域	增加地表下渗率	增大管径50%
5	局部SUDS优化	两个重点易涝区域	增加地表下渗率	
6	局部管网优化	两个重点易涝区域		增大管径100%
7	局部SUDS优化+局部管网优化	两个重点易涝区域	增加地表下渗率	增大管径100%

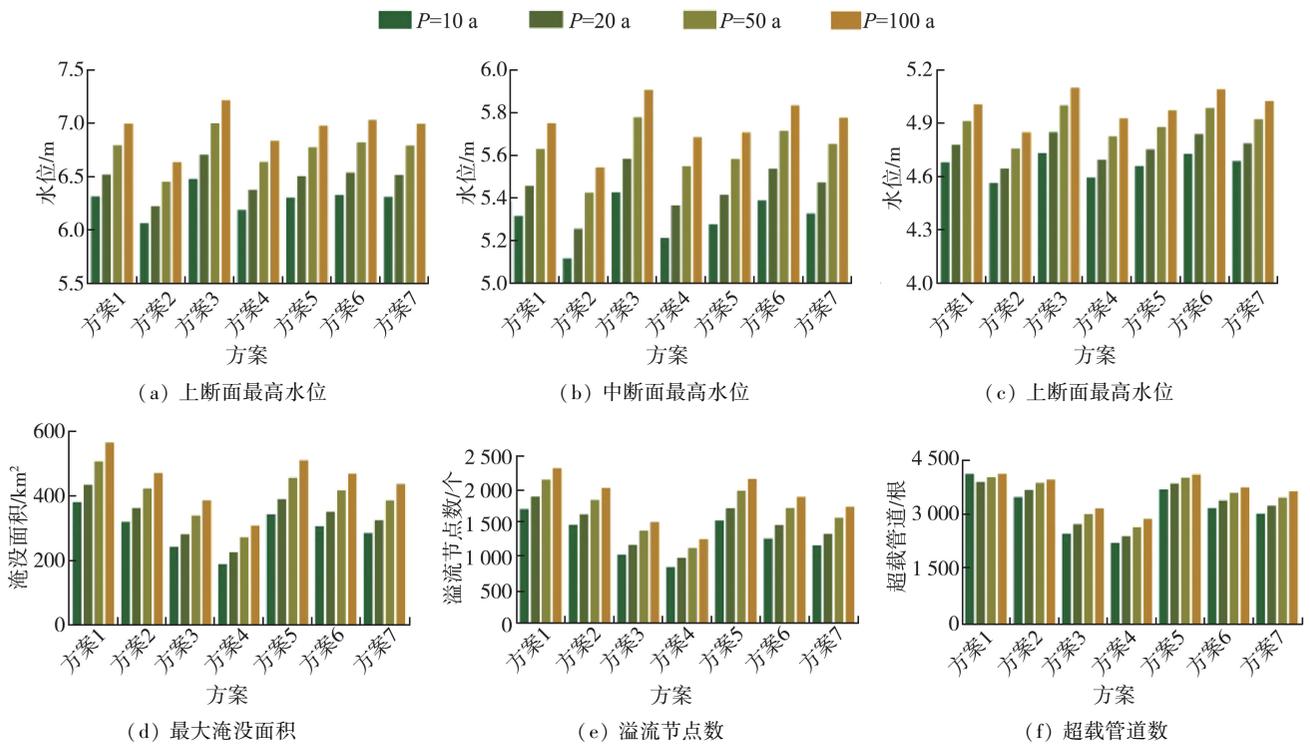


图5 50年一遇降雨下不同海绵改造方案下的模拟结果

Fig.5 Simulation results in different sponge reconstruction schemes under rainfall with 50-year return period

表2 不同SUDS方案下的综合评价指数

Table 2 Comprehensive evaluation index under different SUDS schemes

方案	$P=10\text{ a}$	$P=20\text{ a}$	$P=50\text{ a}$	$P=100\text{ a}$
1	0.19	0.17	0.17	0.18
2	0.68	0.60	0.56	0.58
3	0.36	0.41	0.30	0.41
4	0.86	0.86	0.86	0.84
5	0.34	0.29	0.27	0.28
6	0.29	0.28	0.28	0.26
7	0.43	0.43	0.43	0.40

3.3 海绵改造措施与湖库调度的协同影响

海绵改造措施与湖库调度均对缓解城市内涝有着重要的作用,特别是针对福州等典型水系复杂的沿海城市,应对暴雨内涝时,城市湖库调度对调节城市内河水位以及防洪排涝起到至关重要的作用。湖库调度通过预排预泄、错峰调度等方式加强对城市水系的控制,进而在面对洪涝灾害时能够维持河湖水位,防止河道漫溢造成后续灾害。海绵改造措施则更侧重于减少城市开发等人类活动对原有城市水循环的干扰,通过增加地表下渗率等措施,提倡从源头进行治理,两者相辅相成,共同组成城市防洪排涝协同治理体系。为进一步分析海绵改造措施的影响和模型中的SUDS措施与湖库调度协同作用下的洪涝响应,考虑到与河道距离较近的区域更易受河湖水位影响,且二维水动力学模型计算量一般较大,以琴亭湖下游附近的某排水片区为研究对象,分析湖库联

合调度与SUDS措施组合情景下的城市洪涝情势。

排水片区总面积为 117.52 hm^2 ,位于琴亭湖下游附近约 0.5 km 处,且琴亭湖入湖流量直接受八一水库与井店湖调度控制影响,图6为排水片区下垫面组成与水系概况。根据研究区实际情况,设置八一水库、井店湖与琴亭湖各自的调度规则。暴雨前将八一水库水位降至 44.5 m 以下,结合实测数据控制暴雨中水库的下泄流量,当水库水位上涨时,通过开启闸门增加下泄流量;当水位超过 48.1 m ,



图6 排水片区下垫面组成及水系

Fig.6 Underlying surface composition and water system of drainage area

维持下泄流量不超过 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 。井店湖与附近河道由 3 个闸门相连接,通过比较湖水位与上游来水控制闸门启闭;对琴亭湖则结合湖水位与出流量进行控制,在湖水位不超过 7.8 m 时,保持出流量不超过 $80 \text{ m}^3/\text{s}$ [26]。

结合排水片区现状设置了 3 组对比方案。方案 1 采用原始地块,不进行海绵改造,但由于海绵改造时往往会对原有的子汇水单元作一定调整,该方案采用的子汇水单元与海绵改造后保持一致;方案 2 在方案 1 的基础上,增加 SUDS 措施,以绿色海绵为主,增加区块土壤的滞蓄能力,不进行灰色管道等的改造;方案 3 在方案 2 的基础上,基于两湖一库的调度规则,在模型中增加实时控制 (real time control, RTC),通过调节管道水位边界来缓解内涝情势,发挥海绵改造与调度控制协同效益。排水片区内共有 7 种用地类型,分别为房屋、道路、渗水广场、不渗水广场、裸土、绿地、水体。根据不同的用地类型重新生成精细化的子汇水区,将其汇流至附近主干道多根管网中,并根据管道的长度权重将每个集水区的径流量分配到各个管道中。排水片区的 SUDS 措施设置为绿色屋顶、生物滞留池以及透水铺装 3 种,主要 SUDS 措施参数设置见表 3。

采用“苏迪罗”台风降雨数据进行情景模拟,2015 年 8 月 8 日 0:00 至 8 月 9 日 0:00,“苏迪罗”台风期间总降水量 357.8 mm ,降雨峰值发生在当日 18:25,峰值雨强 70.8 mm/h ,最大降雨集中在 14:00 至 20:00,降雨过程线如图 7 所示。

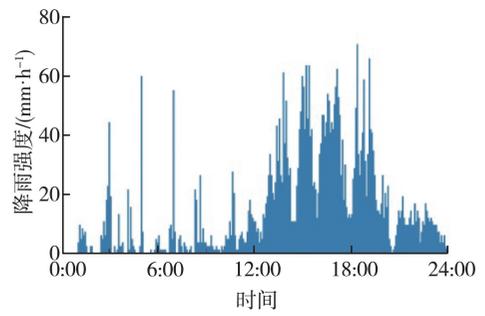


图 7 “苏迪罗”台风降雨过程线

Fig. 7 Rainfall process of typhoon Soudelor

图 8 为“苏迪罗”台风降雨驱动下,城市排水片区最大淹没水深分布。由于河道可能与地表进行水量的交互,在模型中将河岸与地表耦合,在统计淹没面积时将河道漫溢到地表网格的水量也计入统计。结果显示,排水片区在无海绵改造措施下的总淹没面积为 22.87 hm^2 ;加入 SUDS 措施后,淹没面积下降为 22.48 hm^2 ;进一步加入调度规则后,总淹没面积进一步下降为 9.83 hm^2 。排水片区最大淹没水深与流速的模拟结果见表 4,可以看出,在添加 SUDS 设施后,各水深分区及流速分区对应的淹没面积均有不同程度的改善。基于洪水危险性计算方法 [10,27],由淹没水深和流速得到危险性值 H_R 。将情景模拟下的淹没面积根据淹没水深、淹没流速及危险性值 H_R 进行分区,结果见表 5。方案 2 与方案 1 相比,轻度危险性区域面积减少 2.2%,中度危险性区域面积增加 0.7%,重度危险性区域面积减少

表 3 3 种 SUDS 措施主要参数设置

Table 3 Main parameters of three SUDS measures

SUDS 措施	表面层		土壤层			蓄水层			
	表面糙率	表面坡度	土壤类型	土壤厚度/mm	土壤孔隙率	田间持水量	蓄水层传导性/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	蓄水层厚度/ mm	蓄水层孔隙率
绿色屋顶	0.05	0.01	沙壤土	500	0.471	0.342	1.016		
生物滞留池	0.10	0.01	沙壤土	500	0.471	0.342	1.016	150	0.75
透水铺装	0.10	0.01	沙壤土	500	0.471	0.342	1.016	150	0.75

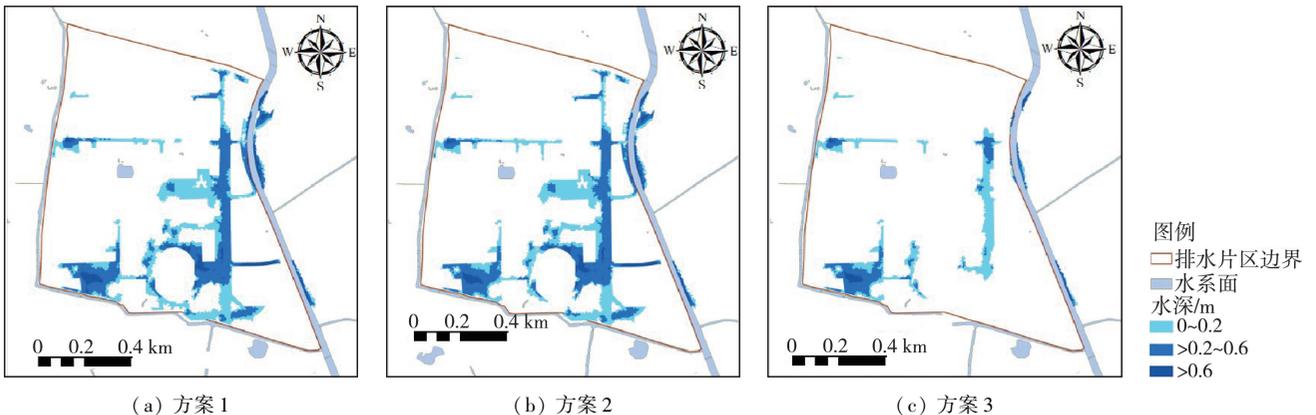


图 8 “苏迪罗”台风降雨驱动下排水片区最大淹没水深分布

Fig. 8 Distribution of maximum water depth in drainage area under typhoon Soudelor

2.4%,极重度危险性区域面积无变化。提取排水片区西南侧魁炉头巷的积水过程发现,经过海绵改造后,最大淹没水深由0.67 m降低为0.64 m,峰现时刻由19:48延迟到20:08,滞后20 min。这是由于海绵设施的建设,使得排水片区土壤入渗量与存蓄量相应增加,且增大的糙率对水流会产生一定程度的阻滞作用,因此,海绵改造对地块发生淹没具有一定的滞后效应。

表4 不同淹没水深与流速对应的淹没面积

Table 4 Inundation areas corresponding to different water depths and velocities

淹没水深/m	流速/(m·s ⁻¹)	淹没面积/hm ²		
		方案1	方案2	方案3
≤0.2		10.73	10.50	5.86
>0.2~0.6		10.05	9.99	3.26
>0.6		2.09	1.99	0.71
	≤1	22.50	22.14	9.72
	>1~3	0.32	0.29	0.09
	>3	0.05	0.05	0.02

表5 不同洪水危险性值对应的淹没面积

Table 5 Inundation areas corresponding to different flood hazards

危险性等级	H _R 取值	淹没面积/hm ²		
		方案1	方案2	方案3
轻度	≤0.75	12.28	12.01	6.71
中度	>0.75~1.25	3.86	3.89	1.81
重度	>1.25~2.00	6.34	6.19	1.07
极重度	>2.00	0.39	0.39	0.24

此外,方案3与方案1相比,轻度、中度、重度、极重度危险性区域面积分别减少了45.4%、53.1%、83.1%和38.5%。在考虑河道与地表网格的侧向连接后,相比于仅采用SUDS措施,引入湖库联合调度规则使得城区内涝情势缓解明显,这主要是因为:①湖库调度直接减弱了河道漫溢的影响。通过湖库调度利用预先腾空的库容进行蓄水,并有效控制了泄流量。而未采用调度措施时,河段水位过高时发生了漫溢,附近地势低洼地带发生内涝,特别是在极端暴雨内涝时,河道漫溢水量与二维地表通过侧向耦合进行交互,相比于提高管网下边界,河道漫溢的水量造成的淹没往往更大。②湖库调度间接减弱了管网下边界的影响。由于管网下游直接汇入河道,河道水位为这部分管网提供了下边界条件。通过湖库调度合理调蓄水库下泄流量与河道断面水位,进而将管网下边界维持在更安全的范围,间接提升了管网系统的排水能力。可以看出,单纯的源头海绵治理措施在面对暴雨或大暴雨时的效果有一定局限,宜通过其他工程措施对内涝灾害进行协同治理。

4 结 论

a. 比较晋安河片区7种SUDS方案,在同一种方案下,随着重现期增加,河道关键断面水位、淹没面积、溢流节点数、超载管道数均呈现增大的趋势。在50年一遇的降雨情景下,最大淹没面积、溢流节点数、超载管道数在方案4下表现最优,而3个断面的水位在方案2下表现最优。方案4与方案1对比,最大淹没面积减少46.5%,溢流节点数减少47.4%,超载管道数减少33.9%。方案2与方案1对比,上断面、中断面、下断面最高水位分别降低5.0%、3.7%、3.2%。其他重现期降雨下的规律与50年一遇降雨类似。

b. 4种重现期降雨下,经过熵权法评估的晋安河片区7种SUDS方案优先选择次序为方案4、方案2、方案7、方案3、方案6、方案5和方案1(无海绵改造),最佳方案为方案4。

c. 对苏迪罗台风降雨模拟结果显示,琴亭湖附近排水片区无海绵改造措施下的总淹没面积为22.87 hm²;加入SUDS措施后,淹没面积下降为22.48 hm²;进一步加入湖库调度后,总淹没面积下降为9.83 hm²。此外,海绵改造对排水片区淹没有一定的滞后效果,经过海绵改造后,排水片区西南侧魁炉头巷最大淹没水深由0.67 m降低为0.64 m,峰现时刻由19:48延迟到20:08,滞后20 min。

d. 本文排水片区算例中考虑了在暴雨洪涝时河道与地表的交互,针对河湖蓄存量和下泄量进行调控的湖库调度对洪涝的减缓作用明显优于海绵改造。

参考文献:

- [1] 徐宗学,赵刚,程涛.“城市看海”:城市水文学面临的挑战与机遇[J].中国防汛抗旱,2016,26(5):54-55. (XU Zongxue, ZHAO Gang, CHENG Tao. “Looking at the sea in City”: challenges and opportunities for urban hydrology [J]. China Flood & Drought Management, 2016, 26(5): 54-55. (in Chinese))
- [2] 章卫军,廖青桃,杨森,等.从郑州“2021.7.20”水灾模型推演看城市洪涝风险管理[J].中国防汛抗旱,2021,31(9):1-4. (ZHANG Weijun, LIAO Qingtao, YANG Sen, et al. Thoughts and inspirations: urban flood risk management inferred from Zhengzhou flood model [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(9): 1-4. (in Chinese))
- [3] 张书函,郑凡东,邸苏闯,等.从郑州“2021.7.20”暴雨洪涝思考北京的城市内涝防治[J].中国防汛抗旱,2021,31(9):5-11. (ZHANG Shuhan, ZHENG Fandong, DI Suchuang, et al. Thoughts on urban waterlogging control in Beijing from the rainstorm and flood of “2021.7.20” in

- Zhengzhou [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(9): 5-11. (in Chinese)
- [4] 柏平, 刘业森, 刘舒, 等. 极端大暴雨对昆明市城市洪涝防御的警示和思考[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(9): 25-29. (BAI Ping, LIU Yesen, LIU Shu, et al. Warning and thoughts of extreme rainstorm on urban flood prevention in Kunming [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(9): 25-29. (in Chinese))
- [5] 谢映霞. 基于海绵城市建设理念的系统治水思路[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 552-555. (XIE Yingxia. Thoughts on systematic water control based on the concept of sponge city construction [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5): 552-555. (in Chinese))
- [6] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. hydrological response to urbanization [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))
- [7] 刘家宏, 王浩, 高学睿, 等. 城市水文学研究综述[J]. 科学通报, 2014, 59(36): 3581-3590. (LIU Jiahong, WANG Hao, GAO Xuerui, et al. Review on urban hydrology [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(36): 3581-3590. (in Chinese))
- [8] 王浩, 王佳, 刘家宏, 等. 城市水循环演变及对策分析[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 3-11. (WANG Hao, WANG Jia, LIU Jiahong, et al. Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 3-11. (in Chinese))
- [9] 徐宗学, 叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟: 原理、模型与展望[J]. 水利学报, 2021, 52(4): 381-392. (XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese))
- [10] 徐宗学, 叶陈雷. 从“城市看海”到“城市看江”: 极端暴雨情景下福州市洪涝过程模拟与风险分析[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(9): 12-20. (XU Zongxue, YE Chenlei. From “looking at sea in city” to “looking at river in city”: simulation and risk analysis of flood and waterlogging process in Fuzhou City under extreme rainstorm scenarios [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(9): 12-20. (in Chinese))
- [11] 程涛, 黄本胜, 邱静, 等. 基于洪涝削减效果的海绵措施优化布局研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(7): 32-46. (CHENG Tao, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Optimization of overall layout of sponge city facilities for flooding alleviation effect [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(7): 32-46. (in Chinese))
- [12] 王丽晶, 潘兴瑶, 王俊文, 等. 基于 InfoWorks ICM 模型的北京市东城区海绵城市改造效果分析与研究[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(9): 43-48. (WANG Lijing, PAN Xingyao, WANG Junwen, et al. Analysis and research on the effects of the sponge city construction in Dongcheng District of Beijing based on InfoWorks ICM model [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(9): 43-48. (in Chinese))
- [13] 高玉琴, 陈佳慧, 王冬冬, 等. 海绵城市低影响开发措施综合效益评价体系及应用[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 13-19. (GAO Yuqin, CHEN Jiahui, WANG Dongdong, et al. Comprehensive benefits evaluation system and application of low impact development measures in sponge city [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 13-19. (in Chinese))
- [14] 王文川, 陈阳, 康爱卿. 基于 SWMM 模型的城市 LID 措施优选研究[J]. 水利规划与设计, 2019(11): 69-72. (WANG Wenchuan, CHEN Yang, KANG Aiqing. Study on optimization urban LID measures based on SWMM model [J]. Water Resources Planning and Design, 2019(11): 69-72. (in Chinese))
- [15] 周昕, 高玉琴, 吴迪. 不同 LID 设施组合对区域雨洪控制效果的影响模拟[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 26-31. (ZHOU Xin, GAO Yuqin, WU Di. Simulation on influence of regional rain-flood control effect under different combinations of LID measures [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 26-31. (in Chinese))
- [16] 黄国如, 赵晓莺, 麦叶鹏. 低影响开发措施对雨水径流的控制效应[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 29-36. (HUANG Guoru, ZHAO Xiaoying, MAI Yepeng. Control effect of low impact development measures on rainwater runoff [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 29-36. (in Chinese))
- [17] 李永坤, 薛联青, 邱苏闯, 等. 基于 Infoworks ICM 模型的典型海绵措施径流减控效果评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 398-405. (LI Yongkun, XUE Lianqing, QIU Suchuang, et al. Evaluation of runoff reduction effect of typical sponge measures based on Infoworks ICM model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 398-405. (in Chinese))
- [18] 雷向东, 赖成光, 王兆礼, 等. LID 改造对城市内涝与面源污染的影响[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 131-139. (LEI Xiangdong, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Influence of LID adaptation on urban flooding and non-point source pollution [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 131-139. (in Chinese))
- [19] 袁绍春, 王怀鋈, 吕波, 等. 基于 InfoWorks_ICM 模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计及评估[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 43-49. (YUAN Shaochun, WANG Huaijun, LYU Bo, et al. Design and evaluation of sponge city reconstruction scheme for old building district in mountainous city based on InfoWorks_ICM model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 43-49. (in Chinese))
- [20] 李莹, 莫淑红, 杨元园, 等. 基于 NSGA-II 算法的海绵城

- 市 LID 设施布设比例优化[J]. 给水排水, 2021, 57(增刊 1): 475-481. (LI Ying, MO Shuhong, YANG Yuanyuan, et al. Optimize proportions of LID facilities with NSGA-II [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57 (Sup1): 475-481. (in Chinese))
- [21] 陈前虎, 邹澄昊, 黄初冬, 等. 基于多目标粒子群算法的 LID 设施优化布局研究[J]. 中国给水排水, 2019, 35(19): 126-132. (CHEN Qianhu, ZOU Chenghao, HUANG Chudong, et al. Optimization of LID facilities layout based on multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(19): 126-132. (in Chinese))
- [22] 刘春腊, 马丽, 刘卫东. 洪水灾害社会经济损失评估方法研究述评[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 136-141. (LIU Chunla, MA Li, LIU Weidong. Evaluation methods on social and economic loss of flood disaster [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 136-141. (in Chinese))
- [23] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks 的城市水系水文水动力过程耦合模拟; 以福州市江北城区及东北部山区为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 609-616. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Coupling simulation of hydrological and hydrodynamics processes for urban river networks based on InfoWorks; case of the urban area and the northeast mountainous area in Fuzhou City [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5): 609-616. (in Chinese))
- [24] 曾招财. 城市内涝风险评估及海绵措施减控效果研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [25] 李辉, 李娜, 俞茜, 等. 海绵城市建设基本原则及灰色与绿色结合的案例浅析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2017, 15(1): 1-9. (LI Hui, LI Na, YU Qian, et al. Integrating green and gray infrastructure into a sustainable future [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017, 15(1): 1-9. (in Chinese))
- [26] 徐冰, 雷晓辉, 王昊, 等. 基于 SWMM 模型的沿海城市内涝模拟研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(3): 211-218. (XU Bing, LEI Xiaohui, WANG Hao, et al. Research on urban flooding simulation in a coastal city based on SWMM model [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(3): 211-218. (in Chinese))
- [27] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks ICM 的城市洪涝模拟及其风险分析; 以福州市白马河片区为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 784-793. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. InfoWorks ICM flood simulation and risk analysis; case of Baima River district, Fuzhou [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(6): 784-793. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-11-17 编辑: 施业)

(上接第 78 页)

- [16] 金菊良, 周戎星, 崔毅, 等. 结构水资资源学概论[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 7-19. (JIN Juliang, ZHOU Rongxing, CUI Yi, et al. Introduction to structural water resources science [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 7-19. (in Chinese))
- [17] ROSENBLATT M. A central limit theorem and a strong mixing condition [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1956, 42(1): 43-47.
- [18] DERIGGI D. A central limit theorem for correlated variables with limited normal or gamma distributions[J]. Communications in Statistics: Theory and Methods, 2019, 48(21): 5213-5222.
- [19] PARK W, NAM K, CHOI S. Determination of the minimum detectability of surface plasmon resonance devices by using the 3σ rule[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2020, 76(11): 1010-1013.
- [20] 金菊良, 赵行玥, 崔毅, 等. 半偏减法集对势在区域旱灾风险评估中的应用[J]. 水利水运工程学报, 2021(1): 36-44. (JIN Juliang, ZHAO Xingyue, CUI Yi, et al. Application of semipartial subtraction set pair potential method to the dynamic assessment of regional drought risk [J]. Hydro-Science and Engineering, 2021 (1): 36-44. (in Chinese))
- [21] 金菊良, 陈鹏飞, 陈梦璐, 等. 水文水资源学家陈守煜先生学术研究的知识图谱分析[J]. 水利学报, 2019, 50(10): 1282-1290. (JIN Juliang, CHEN Pengfei, CHEN Menglu, et al. Knowledge map analysis of academic research of Mr. Chen Shouyu hydrological and water resources specialist [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(10): 1282-1290. (in Chinese))
- [22] CUI Yi, FENG Ping, JIN Juliang, et al. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method[J]. Entropy, 2018, 20(5): 359.
- [23] 戚尚恩, 张学贤, 孙义, 等. 淮北地区小麦播期干旱发生规律及其影响与对策研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(21): 46-53. (QI Shang'en, ZHANG Xuexian, SUN Yi, et al. Studies on the influence and countermeasures of drought and occurrence rule in wheat sowing time in Huabei area [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(21): 46-53. (in Chinese))
- [24] 杜云. 淮河流域农业干旱灾害风险评估研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.

(收稿日期: 2021-12-28 编辑: 施业)